



TITLE:

「光子の裁判」再考

AUTHOR(S):

鹿野, 豊

---

CITATION:

鹿野, 豊. 「光子の裁判」再考. 物性研究 2011, 97(2): 206-215

ISSUE DATE:

2011-11-05

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/169620>

RIGHT:

# 「光子の裁判」再考\*

鹿野 豊 (Yutaka SHIKANO)<sup>†</sup>

東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻

東京都目黒区大岡山 2-12-1

Department of Physics, Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Oh-Okayama, Meguro, Tokyo 152-8551

(2011 年 9 月 27 日受理)

前の記事にある細谷さんの「自分史」にあるように、量子力学の基礎問題への関心は日に日に増してきているように思える。例えば、隔年で開催している東工大-KEK ジョイントワークショップはその好例であろう。中でも、朝永振一郎先生の「量子力学的世界像」[1]に収録されている「光子の裁判」について、現代の視点(特に近年、研究されているアハラノフらによって提唱された“弱測定”および“弱値”の観点)から再考してみたいと思う。

## 1 「光子の裁判」の概略

被告である「波乃光子」(“photon”を擬人化したものと推測される)が2つのドア(2重スリットの実験が想定されている)がついている部屋のどちらから室内に侵入したかを問われ、裁判が進行する。検察官は、被告がどちらかのドアを通して進入したということを実証するために2つの実証実験をしかける。一つ目は、ドアのある壁に対して警察官(ここではディテクターを置いていることに相当する)を並べどこで被告が捕まったかを調べる実験(実験1)。二つ目は、部屋の内外に警察官を敷き詰め、被告を捕まえては離しということを繰り返す実験(実験2)。実験1では、被告「波乃光子」は一人である(一個一個入射されている)ということを確認している実験に対応し、実験2では、その軌跡をたどることができる実験となっている。これから、被告は一人であり、その軌跡をたどる事ができるので被告「波乃光子」はどちらか一方のドアを使って進入したと断定した。それに対して、弁護人は被告がどちらのドアも同時に通って進入したということを実

---

\*本稿は、編集部の方から特にお願いして執筆していただいた記事である。

<sup>†</sup>email: shikano@th.phys.titech.ac.jp

証するために2つの実証実験をしかける。一つ目は、ドアのある壁とドアのない室内の壁に対して警察官を並べ被告を何回も門番のいるところから入射する実験をする(実験3)。二つ目は、ドアのある壁のところで、ドアのところだけは警察官を配置せず実験3と同じ実験を行う(実験4)。すると、実験3と実験4とでドアのない室内の壁にいる警察官にいる被告がつかまる頻度が違うということを指摘し、被告「波乃光子」は2つのドアを同時に入って進入したということを結論づける。しかし、重要なことはこの裁判において、判事は登場するものの判決は出さずに夢から覚めている。つまり、まだこの裁判は係争中であるのだ。

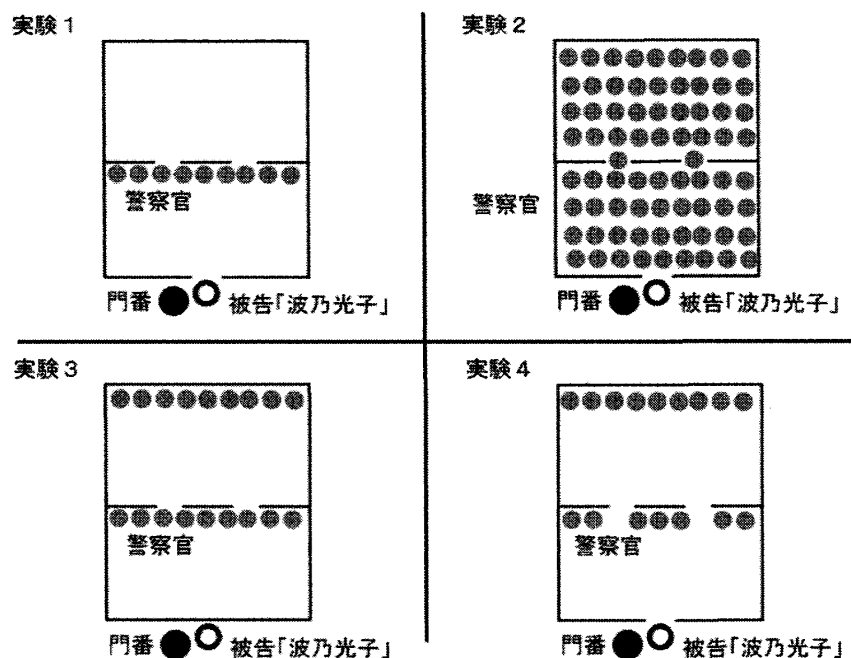


図 1: 「光子の裁判」における4つの実証実験。

実験3と実験4は現代の視点から解析すると“Which-way path experiment”と呼ばれ、実験3の状況で繰り返し実験をし、ドアのところにいる警察官が仮に後で(1日後でも1年後でも良い)被告を捕まえたか捕まえていないかを申告したとしても、申告しなかったケースは実験4のケースと同じ実験結果になり、申告したケースは実験3と同じ実験結果になる。これは“Delayed-Choice Experiment”(遅延選択実験) [2]と呼ばれており、量子力学と情報の間に関係があるという実験結果が既に光を用いて検証されている [3]。また、「光子の裁判」と同じような実験は実験技術の進歩もあり、これが書かれた当時は Young の2重スリット実験程度でしか実験できなかったものの、今では1光子による実験だけでなく他の物理系でも広く実証される現象となった。例えば、電子 [4]、原子 [5]、中性子 [6]、フラウンホーフ [7] など現在でもその大きさや重さは発展し続けるばかりである。将来はバクテリアにおいても干渉縞が出てくるのではないかとという提案さえ存在する。

## 2 「光子の裁判」の実証実験での疑問点

検察官、弁護人双方においての実証実験を忠実に実際の物理系において再現することがいかに難しいのかというのを論じたいと思う。

### 1. 「門番に被告が挨拶をする。」ということは検証可能か？

つまり、「光子が1個入射したということを確認する術があるのか？」ということである。Single photon sourceというのは、単一の量子ドットからの発光や単一のダイヤモンド中の窒素 - 空孔中心 (NV center) によって開発され、2次の自己相関関数を測定することにより確認することも出来る。擬人化されている被告「波乃光子」と光子の決定的な違いは測定することによって状態が変化するかしないかという違いである。擬人化されている被告「波乃光子」は門番と挨拶しても、擬人化されている被告「波乃光子」である。しかし、光子は測定をするとその状態を変化させてしまう。これにより、本当に1光子状態が必ず入ったということを誰が確認できるのか？という術はまだ持ちえていないように見える。原理的にも可能であろうか？

### 2. 実験1では何をしたのか？

実験1では、光子が1個飛んできたということを確認する実験であるが、光子は現代の視点からすれば量子力学に従うはずなので、壁をトンネルしないのか？という疑問が生じる。実際の行われている実験すべてにおいて、スリット間の領域は無限大のポテンシャルがかかっていない。なので、原理的にはトンネル効果が起こってもおかしくないという状況である。その影響は考慮されているのだろうか？

### 3. 実験2は実験可能か？

光子の状態を壊すことなく、光子の通った軌跡を追いかけることが原理的に可能であろうか？という質問に置き換えることができる。旧来から知られていた量子測定フレームワークの中には“量子非破壊測定 (Quantum Nondemolition Measurement)”というのがあり実際、実験もされているが、これは着目している物理量だけが“ほぼ”非破壊に測定できるだけであり、その擾乱の影響は必ず残ってしまう<sup>1</sup>。このため、この方法を用いて1光子の軌跡を測定することは不可能である。しかし、近年、アハラノフらによって提唱された“弱測定 (Weak Measurement)”という概念を用いて1光子の軌跡を捉えたという実験がトロント大学のスタインバーグのグループによってなされた。それを以下のセクションでは解説を行う。

## 3 アハラノフの「弱測定」とは？

元来のアイディアは量子測定に関する以下の疑問によるものである。

<sup>1</sup>この効果があるために量子非破壊測定という用語を使うべきでないという論調も現れた [19]。

質問 1 量子力学はミクロな物理現象を説明するものである。ミクロ現象を記述する基礎方程式はニュートン方程式、マクスウェル方程式、シュレディンガー方程式に顕著に示されるように時間反転対称性の性質を持っている。しかし、何故、量子測定は射影測定に代表されるように時間反転非対称の性質を持っている。これを時間反転対称とするような量子測定の記述方法はないのであろうか？

質問 2 EPR の思考実験 [8] で想定されている “物理的実在 (Physical Reality)” の定義の中に、「状態を乱すことなく確率 1 で物理量が測定することができるもの」とあるが、状態を乱さない測定方法は原理的に存在しないのであろうか？

質問 1 に関しては、量子測定後の状態をポストセレクションすることにより実現された時間反転対称な量子測定理論の確立 [9] により、解決がなされた。時間反転非対称な量子測定においては、物理量  $A$  の固有値  $a_n$  (これに対応する固有ベクトルを  $|a_n\rangle$  とする。) を得る確率は初期状態  $|\psi\rangle$  とすると、ボルンの確率公式により

$$\Pr[A = a_n] = |\langle a_n | \psi \rangle|^2 \quad (1)$$

と与えられる。しかし、時間反転対称な量子測定ではアハラノフ-バーグマン-レボヴィツ (ABL) 公式によりポストセレクションした量子状態を  $|\phi\rangle$  とすると、

$$\Pr[A = a_n] = \frac{|\langle \phi | a_n \rangle|^2 |\langle a_n | \psi \rangle|^2}{\sum_m |\langle \phi | a_m \rangle|^2 |\langle a_m | \psi \rangle|^2} \quad (2)$$

と与えられる。

また、質問 2 に関しては、特別な量子測定過程であれば存在することを示した (これを Protective Measurement と呼んでいる。) [10]。これは、被測定系の初期状態を被測定系のハミルトニアン固有状態とし、被測定系と測定器系の相互作用を断熱的に変化させると測定器系のほうに得たい物理量の期待値が現れる構造になっている。原理的に断熱極限をとっているのでこの測定方法の実装はいまだになされていない。

そして、時間反転対称な量子測定理論と Protective Measurement の概念を組み合わせで “弱測定 (Weak Measurement)” [11] がアハラノフらの提唱された。その際、後述するように量子状態を “ほんの少し” 壊しても良いので、測定器系の期待値の変化を測定することによって “弱値 (Weak Value)” と呼ばれる新しい物理的測定可能量が得られると結論付けた<sup>2</sup>。

被測定系と測定器系の相互作用ハミルトニアンを

$$H_{int}(t) = g(A \otimes \hat{P})\delta(t - t_0), \quad (3)$$

<sup>2</sup>ここで、弱測定 [11] と Protective Measurement の概念 [10] は論文の出版年からすると歴史は逆の順序をたどっているように見えるが、アイデアの出てくる歴史的順番は本稿にあるようであるとアハラノフ自身から教えてもらった。

と与える。ここで、物理量は  $A$  となり、 $\hat{P}$  は測定器系 (ここでは 1 次元の連続変数系を仮定) での運動量作用素、相互作用の大きさを  $g$  とする。時間発展は  $e^{-ig(A \otimes \hat{P})}$  で与えることとなる。ここで、測定器系の初期状態を  $|\xi\rangle$  と置き、被測定系の初期状態を  $|i\rangle$  としてポストセレクションをした量子状態を  $|f\rangle$  とすると、測定器系の測定相互作用後の状態は  $|\xi'\rangle = \langle f|e^{-ig(A \otimes \hat{P})}|i\rangle|\xi\rangle$  となる。ここで、相互作用の強さである  $g$  が小さいと仮定する (これをもって、弱測定と名づけている) と、

$$\begin{aligned} |\xi'\rangle &= \langle f|e^{-ig(A \otimes \hat{P})}|i\rangle|\xi\rangle \\ &= \langle f|[Id. - ig(A \otimes \hat{P})]|i\rangle|\xi\rangle + O(g^2) \\ &= \langle f|i\rangle - ig\langle f|A|i\rangle \otimes \hat{P}|\xi\rangle + O(g^2) \\ &= \langle f|i\rangle \left(1 - ig\langle A \rangle_w \hat{P}\right) |\xi\rangle + O(g^2) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、物理量  $A$  に対する弱値は

$$\langle A \rangle_w := \frac{\langle f|A|i\rangle}{\langle f|i\rangle} \quad (5)$$

と定義される。そこで、測定器系の運動量と位置作用素に対しての期待値のシフトに対して以下の定理が成り立つことが知られている。

**Theorem 1 (Jozsa [12]).** 弱測定をした後の測定器系の運動量作用素 ( $\hat{P}$ ) と位置作用素 ( $\hat{Q}$ ) に対しての期待値のシフトは

$$\Delta[\hat{Q}] = g\text{Re}\langle A \rangle_w + mg\text{Im}\langle A \rangle_w \left. \frac{d\text{Var}[\hat{Q}]}{dt} \right|_{t=t_0}, \quad (6)$$

$$\Delta[\hat{P}] = 2g\text{Im}\langle A \rangle_w \text{Var}[\hat{P}], \quad (7)$$

と与えられる。ここで、

$$\Delta[\hat{Q}] := \frac{\langle \xi'|\hat{Q}|\xi' \rangle}{\langle \xi'|\xi' \rangle} - \langle \xi|\hat{Q}|\xi \rangle, \quad (8)$$

$$\Delta[\hat{P}] := \frac{\langle \xi'|\hat{P}|\xi' \rangle}{\langle \xi'|\xi' \rangle} - \langle \xi|\hat{P}|\xi \rangle, \quad (9)$$

$$\text{Var}[\hat{Q}] := \langle \xi|\hat{Q}^2|\xi \rangle - (\langle \xi|\hat{Q}|\xi \rangle)^2, \quad (10)$$

$$\text{Var}[\hat{P}] := \langle \xi|\hat{P}^2|\xi \rangle - (\langle \xi|\hat{P}|\xi \rangle)^2. \quad (11)$$

と定義し、測定器系のハミルトニアンは

$$\hat{H} = \frac{\hat{P}^2}{2m} + V(Q), \quad (12)$$

とした。その際、 $V(Q)$  は位置座標表示でのポテンシャルとなる。

*Proof.* 測定器系の物理量  $\hat{M}$  に対して、

$$\begin{aligned}
 \langle \xi' | \hat{M} | \xi' \rangle &= \frac{\langle \xi | \hat{M} | \xi \rangle - ig \langle A \rangle_w \langle \xi | \hat{M} \hat{P} | \xi \rangle + ig \overline{\langle A \rangle_w} \langle \xi | \hat{P} \hat{M} | \xi \rangle}{\langle \xi | \xi \rangle - ig \langle A \rangle_w \langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle + ig \overline{\langle A \rangle_w} \langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle} \\
 &= \frac{\langle \xi | \hat{M} | \xi \rangle + ig \operatorname{Re} \langle A \rangle_w \langle \xi | [\hat{P}, \hat{M}] | \xi \rangle + g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \langle \xi | \{\hat{P}, \hat{M}\} | \xi \rangle}{\langle \xi | \xi \rangle + 2g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle} \\
 &= \left( \langle \xi | \hat{M} | \xi \rangle + ig \operatorname{Re} \langle A \rangle_w \langle \xi | [\hat{P}, \hat{M}] | \xi \rangle + g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \langle \xi | \{\hat{P}, \hat{M}\} | \xi \rangle \right) \\
 &\quad \times \left( 1 - 2g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle \right) + O(g^2) \\
 &= \langle \xi | \hat{M} | \xi \rangle + ig \operatorname{Re} \langle A \rangle_w \langle \xi | [\hat{P}, \hat{M}] | \xi \rangle \\
 &\quad + g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \left( \langle \xi | \{\hat{P}, \hat{M}\} | \xi \rangle - 2 \langle \xi | \hat{M} | \xi \rangle \langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle \right) + O(g^2). \tag{13}
 \end{aligned}$$

が成り立つ。ここで、もし  $\hat{M} = \hat{P}$  とすれば、

$$\Delta[\hat{P}] = 2g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \operatorname{Var}[\hat{P}] \tag{14}$$

と得られる。また、 $\hat{M} = \hat{Q}$  とすれば、

$$\Delta[\hat{Q}] = g \operatorname{Re} \langle A \rangle_w + g \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \left( \langle \xi | \{\hat{P}, \hat{Q}\} | \xi \rangle - 2g \langle \xi | \hat{Q} | \xi \rangle \langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle \right) \tag{15}$$

となる。ここで、 $[\hat{P}, \hat{Q}] = -i$  という関係を用いた。エーレンフェストの定理を測定器系に適用し、

$$i \frac{d}{dt} \langle \xi | \hat{Q} | \xi \rangle = \langle \xi | [\hat{Q}, \hat{H}] | \xi \rangle = i \frac{\langle \xi | \hat{P} | \xi \rangle}{m} \tag{16}$$

$$i \frac{d}{dt} \langle \xi | \hat{Q}^2 | \xi \rangle = \langle \xi | [\hat{Q}^2, \hat{H}] | \xi \rangle = i \frac{\langle \xi | \{\hat{P}, \hat{Q}\} | \xi \rangle}{m}. \tag{17}$$

を得て、これらを式 (15) に代入すると

$$\Delta[\hat{Q}] = g \operatorname{Re} \langle A \rangle_w + mg \operatorname{Im} \langle A \rangle_w \left. \frac{d \operatorname{Var}[\hat{Q}]}{dt} \right|_{t=t_0} \tag{18}$$

を得る。 □

上記の定理により、弱値は弱測定により測定器系の期待値のシフトから求められる。よって、弱値自体が測定可能量であるということが分かった。しかし、ここで強調しておきたいのはこの測り方はまったく一意的でないということである。その測り方の比較についてはレビュー論文を見よ [13]。そして、現在までに数多くの実験が既になされており、弱値の定義に分母があるため、その項を小さくすることにより微小な効果を拡大して検証した光のスピンホール効果の検証実験 [14] は記憶に新しい。

また、弱値、弱測定概念自体は近年、日本国内においても研究グループが拡大しているように思える。我々の東工大のグループ [15] もそうであるが、ハーディーパラドックス

の実験的検証 [16] を行った大阪大学の井元グループ、光のバックリアクションを精密に計算し実験的にも検証した [17] 広島大学のグループ、弱値の新しい見つけ方に関して、国立天文台および慶応大学のグループが独立して結果を出している。最近では、固体系での実装を目指す方向など、実験的道具としての機能が議論されるとともに、新しい量子論の基礎に対する知見を見出してくれる道具としての一面も議論されている。私個人としては、これらの理論体系を整備する仕事をするところから生じるものには何か新しい量子論に対する知見が得られるのではないかと期待して、そのブレイクスルーを狙っている。

## 4 トロント大学のグループによる実験 [18]

「光子の裁判」は他の言語に翻訳されたという話は今のところ聞いていないし、少なくとも実験した本人たちは意識していないと思うが、「光子の裁判」の実験 2 の状況を近似的に作り出す実験が行われた。この実験の簡単なセットアップについてまずは紹介する。単一光子源 (ここでは、単一の量子ドットからの発光) を用いて、それを 2 重スリットに入れる。そのディテクターを置いた位置 (警察官に対応する) における位置座標とその位置によってポストセレクションされた運動量の弱値のペアを得る。それをベクトルの流線を描くように結んでいくというのが実験で行ったことである。もう少し、詳細を詰めて行くと、初期の状態は 2 重スリットの位置を 2 次元平面上の座標表示で  $(0, d)$  および  $(0, -d)$  とすると、初期の状態は  $|\psi\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|(0, d)\rangle + |(0, -d)\rangle)$  となる。任意のディテクターの位置を  $\vec{x} = (x, y)$  とすると、得られたペアは

$$\left(\vec{x}, \langle p \rangle_w := \frac{\langle \vec{x} | p | \psi \rangle}{\langle \vec{x} | \psi \rangle}\right) \quad (19)$$

となる。しかし、ここでこのペアをどのように結ぶかという指導原理は与えられておらず理論的にも未解明な部分である。そのため、実験結果の解析として行われたことは、図 2 のようにディテクターの位置を変化をさせながら結んだとしている。ここで重要な結果は、その際、この出来た軌跡をたどれば、どちらのスリットを通ったのかを判別することは可能なのにも関わらず、スクリーンに干渉縞が生じているという実験結果を得ている。これは一見、相補性関係に矛盾している結果のように思えるが、実は運動量の弱値の測り方にトリックが隠されている。

単一光子源から出力された 1 光子を最初に偏光子に通し、

$$|H\rangle + |V\rangle \quad (20)$$

の重ね合わせの状態を生成する。ただし、 $|H\rangle$  と  $|V\rangle$  は水平偏光における正規直交基底である。その後、薄い方解石に通すことによって、

$$e^{igt}|H\rangle + e^{-igt}|V\rangle \quad (21)$$



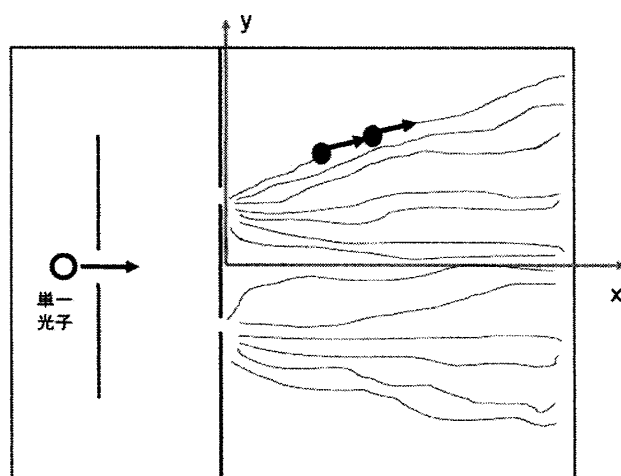


図 2: ペア (19) において、実験結果からの解析をどのように行い、光子の軌跡を求めたかの概略図。黒丸にまずはディテクターを置き、その時の運動量の弱値を測定している。この際、ディテクターはある程度の大きさを持っているためにベクトル量として測定することができる。

という状態を生成する。この際、 $t$  は 1 光子の運動量により時間が決まり、 $g$  は方解石の薄さなどで決まる一定のパラメータである。これにより、位相差がつくために、スクリーンとは垂直の方向にビームディスプレイサーを挿入し、位相差から生じる干渉縞から運動量一個一個の値を算出する。その際、ディテクター (今回の実験では冷やした CCD カメラを使用) を置いた位置によりポストセレクションがなされ、干渉縞の平均値が運動量の弱値として得られる。この際、一個のペアの値 (19) を得るために同じ条件で何度も何度も実験をしている。そのため、実験 1 回 1 回ごとに 2 重スリットのどちらを通っているかを判定しているわけではないために、相補性原理とは矛盾しない。しかし、ここで面白いと思われるのはたくさんの光子を用いて軌跡を平均的に導出することにより、スリットのどちらを通ってきたかを判定することが可能であるということを示唆している。これは「光子の裁判」で言うところの検察官が被告「波乃光子」が複数人いれば、どちらかのドアを通ってきたかを判定することは可能であろうと判事に実証実験つきで示すことができるであろう。これをもって、判事は何を結審するのだろうか？

## 5 おわりに

「光子の裁判」の結審はこれからということになるのであろうと思われる。その量子論の基礎に対する魅力は量子力学を習い始めた時に感じた疑問へと舞い戻る。そこで、「光子の裁判」の夢から覚めた後の一説に習い、以下のように結語する。

気がついてみると、私はアハラノフの “Quantum Paradoxes” を読みながら本に顔をおしつけてうたたねをしていたのでした。「水飲むアヒル」の玩具の水

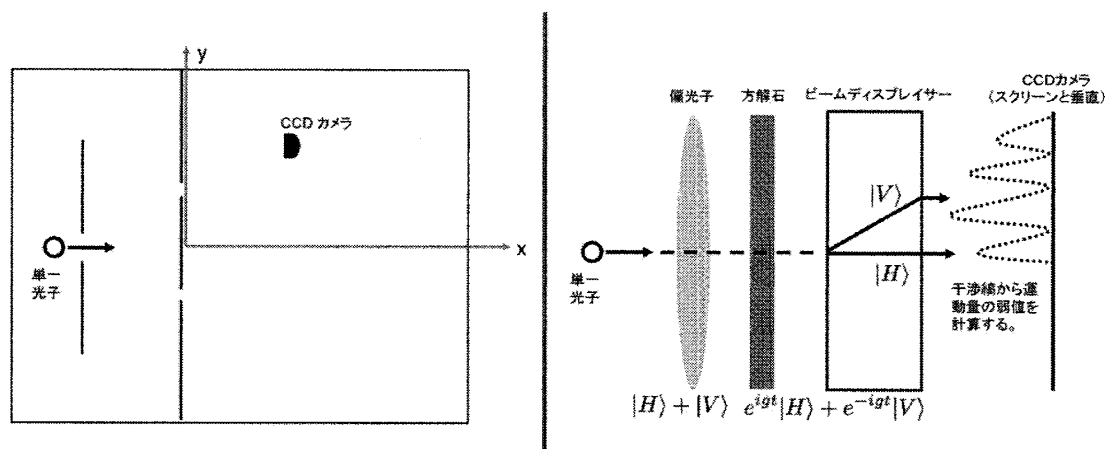


図 3: 左の図は CCD カメラの位置によるポストセレクションを行う概略図。右の図は、運動量の弱値を求めるスキームを示した概略図。

がすっかりとなくなってしまう、黄色い西日のかげは部屋のむこうにあるホワイトボードまでのびています。ずいぶんと長い、ややこしい夢からさめた私は、不思議の国のアリスのように、しばらくそのまま呆然としていました。そして見るともなく西日の差し込んだホワイトボードをみますと、学生さんたちが “Quantum Paradoxes” の一節を読みああでもないこうでもないで議論をしていました。学生さんが「光子の裁判」の判決について私に意見を求めてきたので、私はこう答えました。

「それはきっと面白い問題でしょう。さあ、自分で考えてみてください。ヌフフ。。(笑)」

私個人的なことになるが、東工大で量子論の基礎を幅広く自由な発想で研究を進めさせていただき、それで学位まで取得させていただいた指導教員である細谷さんには非常に感謝したい。

最後になりましたが、本稿を書く契機を与えていただいた物性研究の編集委員の皆様とこの記事を書くにあたり議論していただいたテレアビブ大学の Yakir Aharonov とトロント大学の Aephraim M. Steinberg および文章の推敲作業に協力していただいた岩崎皓さんに感謝の辞を述べさせていただきたいと思います。

## 参考文献

- [1] 「量子力学的世界像」 朝永振一郎著（みすず書房）。
- [2] J. A. Wheeler, “The ‘Past’ and the ‘Delayed-Choice Double-Slit Experiment’,” in *Mathematical Foundations of Quantum Theory* (Academic Press, 1978) edited by A.R. Marlow.

- [3] V. Jacques, E. Wu, F. Grosshans, F. Treussart, P. Grangier, A. Aspect, J.-F. Roch, *Science* **315**, 966 (2007).
- [4] A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki, and H. Ezawa, *Am. J. Phys.* **57**, 117 (1989).
- [5] O. Carnal and J. Mlynek, *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2689 (1991).
- [6] J. Summhammer, H. Rauch, and D. Tuppinger, *Phys. Rev. A* **36**, 4447 (1987).
- [7] M. Arndt, O. Naiz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, and A. Zeilinger, *Nature* **401**, 680 (1999); O. Naiz, M. Arndt, A. Zeilinger, *Am. J. Phys.* **71**, 319 (2003).
- [8] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
- [9] Y. Aharonov, P. G. Bergmann, and J. L. Lebowitz, *Phys. Rev.* **134**, B1410 (1964).
- [10] Y. Aharonov, J. Anandan, and L. Vaidman, *Phys. Rev. A* **47**, 4616 (1993).
- [11] Y. Aharonov, D. Z. Albert, and L. Vaidman, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1351 (1988).
- [12] R. Jozsa, *Phys. Rev. A* **76**, 044103 (2007).
- [13] Y. Shikano, Ph.D. Dissertation at Tokyo Institute of Technology (2011); Y. Shikano, in *Quantum Mechanics / Book 2* (InTech, to be published) as the reviewed book chapter.
- [14] O. Hosten and P. Kwiat, *Science* **319**, 787 (2008).
- [15] Y. Shikano and A. Hosoya, *J. Phys. A* **42**, 025304 (2010); A. Hosoya and Y. Shikano, *J. Phys. A* **43**, 385307 (2010); S. Kagami, Y. Shikano, and K. Asahi, *Physica E* **43**, 761 (2011); A. Hosoya and M. Koga, *J. Phys. A* **44**, 415303 (2011); Y. Shikano and S. Tanaka, arXiv:1007.5370 to be published from *Europhys. Lett.*
- [16] K. Yokota, T. Yamamoto, M. Koashi, and N. Imoto, *New J. Phys.* **11**, 033011 (2009).
- [17] M. Iinuma, Y. Suzuki, G. Taguchi, Y. Kadoya, and H. F. Hofmann, *New J. Phys.* **13**, 033041 (2011).
- [18] S. Kocsis, B. Braverman, S. Ravets, M. J. Stevens, R. P. Mirin, L. K. Shalm, and A. M. Steinberg, *Science* **332**, 1170 (2011).
- [19] C. Monroe, *Physics Today* **64**, 8 (2011).